

**Konrad Dąbala**  
**Jacek Dudziński**  
**Andrzej Rudeński**  
Instytut Elektrotechniki, Warszawa

## SILNIKI DO NAPĘDU BEZPOŚREDNIEGO POJAZDÓW ELEKTRYCZNYCH

### MOTORS FOR ELECTRICAL VEHICLE DIRECT DRIVE

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono wady i zalety napędu bezpośredniego pojazdu elektrycznego, metodę projektowania silników, parametry różnych typów silników wykonanych i zastosowanych w pojazdach opracowanych w Instytucie Elektrotechniki w Warszawie.

**Abstract:** Strengths and weaknesses of electrical vehicle direct drive, the method of motors design, parameters of different motor types made and applied in vehicles elaborated in Electrotechnical Institute in Warsaw are presented in the paper.

**Słowa kluczowe:** *maszyny elektryczne, silniki magnetoelektryczne*  
**Keywords:** *electrical machines, magnetoelectric motors*

#### 1. Wstęp

Napęd elektryczny bezpośredni pojazdu ma ponad 100 lat. Pionierem w tej dziedzinie był Ferdinand Porsche. W 1900 roku skonstruował on pojazd, który nazwano Samper Vivus. Samochód powstał przy współpracy z wytwórnią powozów i jednocześnie pierwszym w Austrii producentem pojazdów mechanicznych Ludwig Lohner & Co. Napędzały go dwa silniki umieszczone w przednich kołach. Energia elektryczna była magazynowana w akumulatorach, które były ładowane z prądnicy napędzanej silnikiem spalinowym [1].

Z powodu braku źródeł zasilania o dużej gęstości energii napęd elektryczny pojazdów na wiele dziesiątków lat został wyparty przez napęd spalinowy. Dopiero rozwój akumulatorów o dużej gęstości energii (kilkakrotnie większej niż w tradycyjnych akumulatorach kwasowo-ołowiowych) pociągnął za sobą rozwój napędów elektrycznych pojazdów. Drugim nie mniej ważnym powodem jest ekologia. Upowszechnienie samochodów elektrycznych ma bowiem ogromny wpływ na zmniejszenie ilości spalin i hałasu, co jest szczególnie uciążliwe w dużych aglomeracjach miejskich. Już obecnie w niektórych miastach Europy Zachodniej istnieją strefy, w których dopuszczalny jest ruch tylko pojazdów elektrycznych.

#### 2. Zalety i wady napędu bezpośredniego

Przez napęd bezpośredni rozumie się napędzanie pojazdu silnikiem umieszczonym w kole.

Umieszczenie silnika w kole ma wiele zalet [1], w tym:

- brak potrzeby transmisji, pól napędowych, mechanizmów różnicowych lub innych złożonych elementów mechanicznych;
- możliwość montażu dodatkowych modułów akumulatorów, zwiększających zasięg i moc pojazdów porównaniu do poprzednich pojazdów elektrycznych;
- bardziej efektywne hamowanie regeneracyjne;
- większe możliwości w projektowaniu wnętrza pojazdu przez stylistów wynikające z braku takich elementów jak dźwignia zmiany biegów, tunel centralny itp.

Wady:

- zwiększenie tzw. masy nieresorowanej;
- zwiększenie bezwładności przy zmianie kierunku.

Pomimo wady związanej ze zwiększeniem masy nieresorowanej fachowcy od motoryzacji [2] twierdzą, że:

- mimo zauważalnych różnic w próbach jezdnych wynikających ze zwiększonej masy nieresorowanej, niekorzystne efekty

są na ogół małe i praktycznie niezauważalne dla przeciętnego kierowcy;

- możliwość indywidualnego sterowania silnikami w kołach daje duże możliwości poprawy właściwości jezdnych pojazdu poprzez zastosowanie odpowiednich rozwiązań konstrukcyjnych.

### 3. Podział silników do napędu bezpośredniego

Silniki do napędu bezpośredniego można podzielić:

- ze względu na drogę strumienia: na silniki o strumieniu osiowym i silniki o strumieniu promieniowym;
- ze względu na znamionową prędkość obrotową: na silniki niskoobrotowe (prędkość obrotowa mniejsza niż 350 1/min) i silniki wysokoobrotowe (prędkość obrotowa większa niż 1000 1/min).

### 4. Metoda obliczeń silnika w kole

W chwili obecnej prowadzone są prace studialne i tworzone prototypy silników elektrycznych przeznaczonych do napędu samochodów elektrycznych. Dotyczy to przede wszystkim silników magnetoelektrycznych tj. z magnesami trwałymi. Powstają różnego typu konstrukcje takich silników, nie tylko poza granicami naszego kraju. Również Instytut Elektrotechniki prowadzi prace nad napędem bezpośrednim.

W roku 2009 w Zakładzie Maszyn Elektrycznych IEL opracowano program obliczeń oraz wykonano model silnika magnetoelektrycznego wzbudzanego magnesami trwałymi z komutatorem elektronicznym [3]. Do obliczeń projektowych silnika użyto autorskiego oprogramowania opracowanego w Zakładzie Maszyn Elektrycznych pod nazwą „Design of the DC Brushless Motors with Permanent Magnets”. Oprogramowanie to zostało stworzone w oparciu o opracowaną metodę obliczeń bezszczotkowych silników prądu stałego o magnesach trwałych. Metoda obliczeń projektowych dotyczy silników o strukturze walcowej z łupinowymi magnesami w wirniku oraz z dwuwarstwowym uzwojeniem trójfazowym, skojarzonym w gwiazdę umieszczonym w żłobkach twornika. Jako magnesy trwale zastosowano trójskładnikowy materiał żelazo-neodym-bor o dużej gęstości energii magnetycznej. Zakres mocy

znamionowej silników projektowanych za pomocą tej metody nie przekracza ok. 20 kW choć nie stanowi istotnego ograniczenia. Prędkość obrotowa maksymalna nie przekracza ok. 5000 obr/min i jest ograniczona ze względu na częstotliwość strumienia w stojanie. Oprogramowanie umożliwia optymalizację wymiarów silnika. Jako kryterium optymalizacji przy projektowaniu silników przyjmuje się minimalizację kosztu materiałów czynnych użytych podczas wytworzenia danego silnika.

Algorytm obliczeniowy silników rozbudowano tak, aby można było wariantowo zaprojektować silnik o założonej strukturze, tj. o:

- nieruchomym zewnętrznym tworniku w stojanie oraz magnesami trwałymi w wewnętrznym wirniku;
- nieruchomym wewnętrznym tworniku oraz magnesami trwałymi w zewnętrznym wirniku.

Podstawowe cechy silników:

- rodzaj symetrii – walcowa;
- wzajemne położenie głównych elementów: stojan wewnętrzny, wirnik zewnętrzny;
- stopień ochrony: IP44 lub IP55;
- położenie osi wału – poziome;
- połączenie z urządzeniem napędzanym: napęd trakcyjny – koło jezdne pojazdu mocowane do zewnętrznego wirnika;
- posadowienie - mocowanie do konstrukcji pojazdu;
- połączenie ze źródłem napięcia: poprzez 3 przewody dwuwarstwowego uzwojenia trójfazowego skojarzonego w gwiazdę wyprowadzone w wydrążonym wale stojana i doprowadzone do wyjścia zasilacza półprzewodnikowego;
- sposób sterowania: poprzez specjalny impulsator z trzema transoptorami odbiciowymi umieszczonymi na tarczy nieruchomej względem stojana i odpowiednio ustawionej względem żłobków z początkowymi zezwojami pasm.

### 5. Modele wykonanych silników i ich parametry

W Zakładzie Maszyn Elektrycznych IEL powstały 3 typy takich silników o strukturze z nieruchomym wewnętrznym twornikiem oraz magnesami trwałymi umieszczonymi w zewnętrznym wirniku. Jeden z wykonanych silników posiada budowę tarczową [4]. Są to silniki wolnoobrotowe. Napięcie znamionowe

silników wynosi 96 V (DC). Ich parametry znamionowe zestawiono w tablicy 1.

Tablica 1. Zestawienie parametrów znamionowych silników magnetoelektrycznych wolnoobrotowych wzbudzanych magnesami trwałymi wykonanych w Instytucie Elektrotechniki.

Typ silnika	$M_N$	$n_N$	Budowa o strumieniu
	Nm	min <sup>-1</sup>	
ETMmt-35/12	35	320	osiowym
ETMm-60/12	60	320	promieniowym
ETMm-180/12	180	107	promieniowym

Silniki ETMm-60/12 są przeznaczone do montowania w felgach o średnicy 13", zaś silniki ETMmt-35/12 i ETMm-180/12 w felgach o średnicy 15".

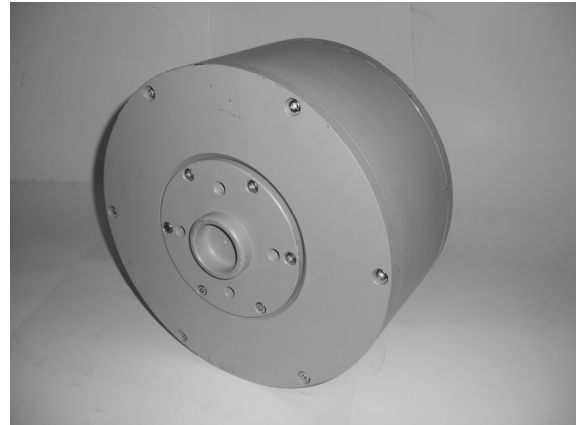
Na zdjęciach 1-4 przedstawiono w/w modele silników.



Rys. 1. Widok silnika ETMm-60/12 zamontowanego w kole (widok od strony zewnętrznej)



Rys. 2. Widok silnika ETMm-60/12 zamontowanego w kole (widok od strony wewnętrznej)



Rys. 3. Silnik typu ETMm-180/12 (widok od strony mocowania koła pojazdu)



Rys. 4. Silniki (od lewej) typu ETMm-60/12, ETMmt-35/12, ETMm-180/12 (widok od strony mocowania do pojazdu)

Obecnie w Zakładzie Maszyn Elektrycznych Instytutu Elektrotechniki prowadzone są prace nad konstrukcją silnika wysokoobrotowego o momencie znamionowym 300 Nm oraz znamionowej prędkości obrotowej 1000 min<sup>-1</sup>. Silnik przystosowany będzie do zamontowania w kole pojazdu o średnicy 17". Wyposażony będzie m.in. w chłodzenie cieczowe oraz hamulec elektryczny.

## 6. Pojazdy z silnikami w kołach wykonane w Instytucie Elektrotechniki

Dwa silniki ETMm-60/12 zostały zamontowane do pojazdu typu „Melex” (fot. 5). Przeprowadzono m.in. próby drogowe, które wykazały, że kierowalność pojazdu po zamontowaniu napędu bezpośredniego nie zmieniła się. Pojazd osiąga lepsze parametry, takie jak przyśpieszenie oraz prędkość maksymalną w porównaniu do wersji fabrycznej.



Rys. 5. Pojazd z zamontowanymi silnikami ETMm-60/12

Silniki o największym momencie znamionowym typu ETMm-180/12 opracowano i wykonano do pojazdu do 1 tony, realizowanego w ramach trwającego projektu rozwojowego (fot. 6). Pojazd ten przeszedł pozytywnie pierwsze próby jezdne.



Rys. 6. Pojazd do 1 tony z zamontowanymi silnikami ETMm-180/1

## 7. Podsumowanie

Przydatność opracowanych w Zakładzie Maszyn Elektrycznych Instytutu Elektrotechniki metod projektowania silników magnetoelektrycznych została potwierdzona przez wykorzystanie ich do zaprojektowania dwóch typów silników o strumieniu promieniowym i jednego typu silnika tarczowego o strumieniu osiowym. Są to silniki wolnoobrotowe z wirnikiem zewnętrznym o momencie znamionowym 60 Nm, 180 Nm i 35 Nm przystosowane do zamontowania w kole. Wykonano i przebadano kilka modeli takich silników. Badania dotyczyły zarówno samych silników jak i ich własności zamontowanych w pojeździe (oprócz silnika o strumieniu osiowym, który jest jeszcze w fazie badań). Silniki o strumieniu promieniowym

charakteryzują się m.in. bardzo małym momentem zaczepowym wynoszącym 0,9 % [5]. W silniku tarczowym bezrdzeniowym moment ten wynosi 0 % [4]. Podczas prób jezdnych stwierdzono pełną przydatność obu typów silników (60 Nm i 180 Nm) do napędu pojazdów elektrycznych wolnobieżnych. Stwierdzono także, że możliwe jest użycie tylko jednego silnika w kole. Rozwiązanie takie zmniejsza koszt pojazdu, ale nie jest wtedy możliwe indywidualne sterowanie silnikami.

## 8. Literatura

- [1]. Dąbała K., Dudziński J.: *Napęd bezpośredni w pojazdach samochodowych – przegląd konstrukcji*. Prace Instytutu Elektrotechniki nr 260, 2012, wyd. Instytut Elektrotechniki, s. 257-270
- [2]. Anderson M., Harty D.: *Unsprung Mass with In-Wheel Motors - Myths and Realities*. AVEC 10, 2010, wyd. <http://www.proteanelectric.com/wp-content/uploads/2011/12/protean-Services3.pdf>, s. 261-266
- [3]. Rudeński A.: *Rozwinięcie metody i programu obliczeń silników magnetoelektrycznych o komutacji elektronicznej oraz zaprojektowanie i wykonanie prototypu silnika z zewnętrznym wirnikiem*. Dok. IEL 24/2009
- [4]. Dąbała K., Rudeński A.: *Silnik magnetoelektryczny tarczowy z twornikiem bez rdzenia ferromagnetycznego*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej Nr 66, seria Studia i Materiały nr 32: Zagadnienia maszyn, napędów i pomiarów elektrycznych, Wrocław 2012, s. 152-157
- [5]. Krzemień Z.: *Pomiary momentu zaczepowego w maszynach synchronicznych z magnesami trwałymi*. Przegląd Elektrotechniczny nr 10a, 2012, s. 101-105

## Autorzy

dr inż. Konrad Dąbała  
tel. 0-22 812-30-20  
e-mail: k.dabala@iel.waw.pl  
mgr inż. Jacek Dudziński  
e-mail: j.dudzinski@iel.waw.pl  
dr inż. Andrzej Rudeński  
e-mail: a.rudenski@iel.waw.pl  
Instytut Elektrotechniki, Zakład Maszyn Elektrycznych  
04-703 Warszawa, ul. Pozaryskiego 28

## Informacje dodatkowe

Praca finansowana m. in. w ramach projektu rozwojowego *Opracowanie pojazdu z napędem elektrycznym, osobowo-towarowego o masie całkowitej do 1 tony*. Nr N R01 0005 10.

## Recenzent

Prof. dr hab. inż. Andrzej Pochanke